

分散 MIMO 協調伝送技術とその特性

安達文幸[†] アムナート・ブンカジャイ^{††} 斎藤智之^{††} 関裕太^{††}

東北大学電気通信研究機構

〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号

E-mail: [†]adachi@eiei.tohoku.ac.jp, ^{††}{amnart,seki,saito.tmm}@riec.tohoku.ac.jp

あらまし 本論文は 5G 研究開発プロジェクト(2015~2018 年度)で研究開発を行った分散 MIMO 協調伝送技術の総合報告である。まず分散 MIMO 協調伝送の概要を述べ、次いで劣悪な環境における伝送特性改善を目指した時空間符号化送信ダイバーシティ(STBC-TD), 合計スループットの向上を目指したマルチユーザ伝送(MMSE-SVD), および送信ピーク電力低減を目指したブラインド SLM の原理とそれらの特性について紹介する。そして、周波数利用効率の飛躍的向上を目指して同一周波数を分散 MIMO エリア内で繰り返し利用するためのユーザクラスタリングとアンテナ選択について述べるとともに、分散 MIMO 無線セル間の干渉を低減するセル間干渉調整(ICIC)の原理とそれらの特性について紹介する。

キーワード 5G, 分散アンテナ, 協調信号伝送, クラスタリング, アンテナ選択

Distributed MIMO Cooperative Transmission Technique and Its Performance

Fumiyuki Adachi[†] Amnart Boonkajay^{††} Tomoyuki Saito^{††} Yuta Seki^{††}

ROEC, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan

E-mail: [†]adachi@eiei.tohoku.ac.jp, ^{††}{amnart,seki,saito.tmm}@riec.tohoku.ac.jp

Abstract This paper presents a comprehensive introduction of the distributed MIMO cooperative transmission technique which has been developed under the framework of national 5G research & development (4 year project of 2015~2018). Firstly, the system concept of distributed MIMO is presented and then, the operation principles of single-user space-time block code transmit diversity (STBC-TD), multi-user minimum mean square error (MMSE) based filtering jointly used with eigenmode filtering obtained by singular value decomposition (SVD) called MMSE-SVD in short and blind selected mapping (blind SLM) are described, followed by their performance evaluation by extensive computer simulation. To significantly improve the link capacity by reusing the same frequency resource as many times as possible within each BS area, the user clustering and antenna selection is presented. Also presented is the decentralized inter-cell (or inter-BS) interference coordination (ICIC) for distributed MIMO radio access network.

Keywords 5G, Distributed antenna, Cooperative signal transmission, Clustering, Antenna selection

1. はじめに

1980 年代から始まった移動通信システムは 30 年をかけて第 1 世代(1G)システムから第 4 世代(4G)システムへと進化し、今や現代社会の重要な社会基盤になった。そして、超高速通信(ピーク 20Gbps)に加えて、IoT デバイスなどの超多数接続(百万デバイス/km²)や超高信頼低遅延通信(無線区間 1m 秒以下)というこれまでにならない新たなビジネス展開を可能とする第 5 世代移動通信システム(5G)システムへの期待が高まっている。日本では 2015 年 9 月より、5G システム実現に向けた総務省委託研究開発が開始された[1]。筆者らのグループは、通信エリア内に分散配置した多数のアンテナの中から端末近傍のいくつかのアンテナを選択して通信を行う分散マルチアンテナ(MIMO)協調伝送[2]の研究開発を行ってきた。本稿は、MIMO 協調伝送の研究開発成果を取りまとめて総合報告である。

2. 分散 MIMO システムの概要

分散 MIMO システムは、無線信号処理機能や無線資源管理機能を有する基地局(BS)とそれが受け持つ通信エリア内に分散配置した多数のアンテナから構成される(図 1)。5G システムでは 4G システムより広い帯域幅(100MHz 超)を利用した超高速伝送が期待されている。広帯域無線伝搬路は周波数選択性がかなり強くなる。このため、強力なチャネル等化が必要であり、周波数領域等化(FDE)[3-5]が期待できる。チャネル等化のためには無線伝搬路の構造を表すチャネル情報が必要である。送受信に同じ搬送波周波数を用いる時分割複信(TDD)を用いれば、上りリンク(端末→BS 側)のチャネル推定結果を下りリンク(BS 側→端末)送信に再利用できる(図 2)。このことから、チャネル等化などで必要になる BS と各ユーザ端末間のチャネル情報を BS に集約して持たせることができる。そこで分散 MIMO 協調伝送では、BS 側に上下リンク伝送のためのチャネル等化機能を持たせている(図 3)。

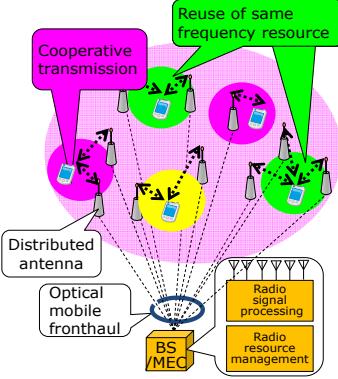


図 1 分散 MIMO システム

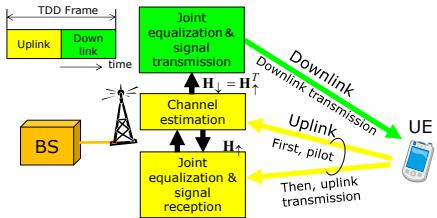


図 2 BS でのチャネル等化と信号送受信の結合処理を可能とする TDD

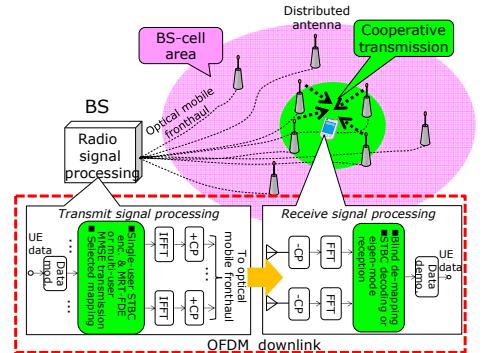


図 3 分散 MIMO 協調伝送(下りリンク OFDM)

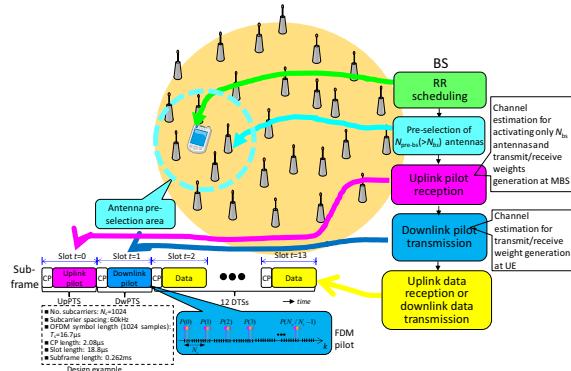


図 4 MIMO チャネル推定と上り/下りリンク伝送の手順

3. 分散 MIMO 協調伝送

3.1 MIMO チャネル推定と上り/下りリンク伝送の手順

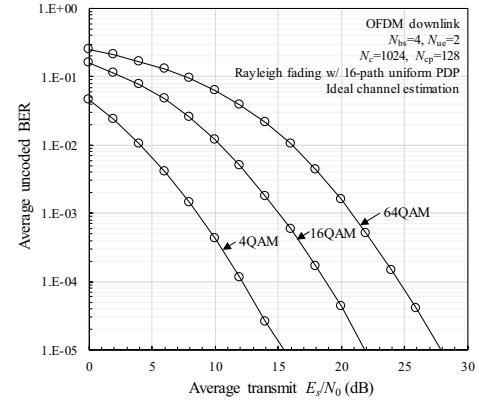
MIMO チャネル推定と上り/下りリンク伝送の手順を図 4 に示す。サブフレームは 14 スロット構成であり、上りリンクパイロットと下りリンクパイロットに続く 12 スロットはユーザデータスロットである。まず、ラウンドロビン (RR) スケジューリングにより予め決められた順番でアクティブユーザ端末 (UE) の中から UE を選択する。そして、スロット時刻 $t=0$ において UE

から上りリンク直交パイロットを送信し、それを BS では N_{BS} 本の分散アンテナで受信してチャネル推定する。次いでスロット時刻 $t=1$ において、BS は N_{BS} 本の分散アンテナの中から N_{bs} 本のアンテナを選択して下りリンク直交パイロットを対象 UE に向けて送信し、それを受信した UE がチャネル推定を行う。

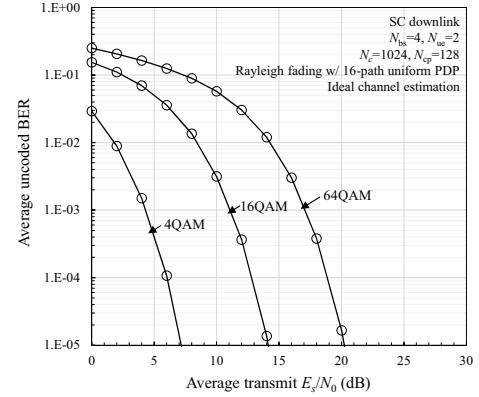
3.2 STBC-TD

符号化率 1 の Alamouti STBC 符号化[6]を用いる。OFDM 下りリンクでは、STBC 符号化の後に最大比規範周波数領域送信等化 (MRT-FDE) を施して N_{bs} 行 $\times 2$ 列の送信シンボル行列へと変換してから、2 つの列ベクトルを順番に、それぞれ N_{bs} 本 (任意) の分散アンテナより送信する。このとき UE 側では、 $N_{\text{ue}}=2$ 本のアンテナで受信して STBC 復号する。一方、SC 上りリンクでは、STBC 符号化と復号を周波数領域で行う。受信 (BS) 側では N_{bs} 本 (任意) の分散アンテナで受信した後に最小自乗誤差規範周波数領域受信等化 (MMSE-FDE) を施してから STBC 復号する。このようすれば、上下リンク共に $N_{\text{ue}}(=2) \times N_{\text{bs}}$ に等しい大きな次数の空間ダイバーシティ利得を得ることができる[7]。

まず、BS アンテナ本数 $N_{\text{bs}}=4$ と UE アンテナ本数 $N_{\text{ue}}=2$ 本とし、16 パス周波数選択性レイリーフェージング環境 (伝搬損失およびシャドウイング損失なし) のときの BER 特性を計算機シミュレーションで求めた。その結果を図 5 に示す。総サブキャリア数 N_c は 1024 で、2 台の UE を周波数分割多重して STBC-TD 伝送を行うものとした。また、QAM 変調 (4, 16, 64 値)、理想チャネル推定を仮定した。SC 上りリンクの BER 特性が OFDM 下りリンクの BER 特性より僅かに良いのは周波数ダイバーシティ効果によるものである。



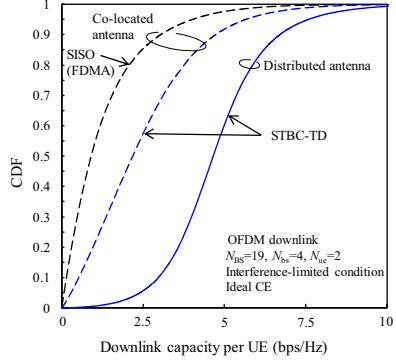
(a)OFDM 下りリンク



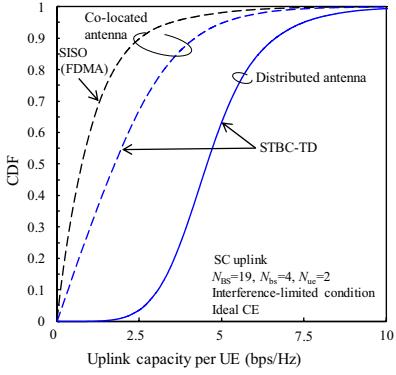
(b)SC 上りリンク

図 5 周波数選択性環境下での STBC-TD の BER 特性

より固有モードフィルタを生成する[8,9].



(a) OFDM 下りリンク



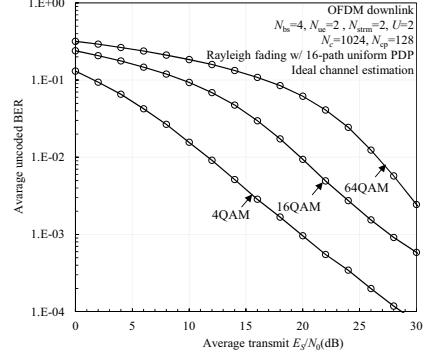
(b) SC 上りリンク

図 6 UE リンク容量

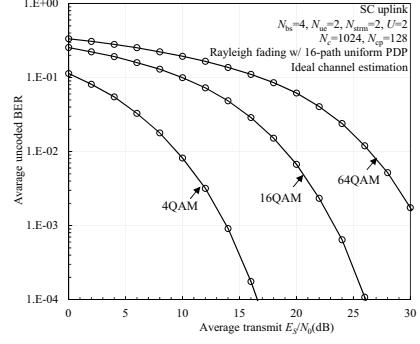
次に、UE リンク容量の確率分布を計算機シミュレーションにより求めた。その結果を図 6 に示す。マクロセル内に 19 本の分散アンテナを規則的に配置し、2 本のアンテナを搭載した 2 UE をランダム配置した。なお、注目 BS セルの周辺に 6BS セルが干渉セルとして存在するものとし、BS 側では熱雑音電力に加えて他セル間干渉電力を考慮して MMSE-FDE 重みを生成するものとした。伝搬損失指数 α およびシャドウイング損失の標準偏差 σ はそれぞれ $\alpha=3.5$ および $\sigma=7\text{dB}$ とした。分散アンテナと UE 間の距離が分散アンテナ間距離のおよそ半分以下であれば $K=10\text{dB}$ の周波数選択性伸上・ライスフェージングチャネル、そうでなければ周波数選択性レイリーフェージングになるものとした。分散アンテナ協調信号伝送は、19 本のアンテナを集中配置した場合に比べて、リンク容量を大幅に向上できることが分かる。

3.3 MMSE-SVD

N_{bs} 本の分散アンテナを BS エリアに配置し、その中から平均受信電力の大きい順に $N_{bs}=4$ 本のアンテナを選択し、2 ストリーム伝送する UE (アンテナ本数は $N_{ue}=2$) を 2 重重する。OFDM 下りと SC 上りのサブキャリア数は N_c 本である。OFDM 下りリンク MMSE-SVD では、BS 送信に MMSE フィルタを適用し IAI および IUI を同時に抑圧し、UE 受信フィルタに特異値分解 (SVD) を用いて生成する固有モードフィルタを適用し IAI を抑圧する。一方、SC 上りリンク MMSE-SVD では、BS 受信フィルタに MMSE フィルタを適用し IAI および IUI を同時に抑圧し、UE 送信フィルタに SVD を用いて生成する固有モードフィルタを適用し IAI を抑圧する。同一周波干渉 (CCI) を考慮して MMSE 行列お

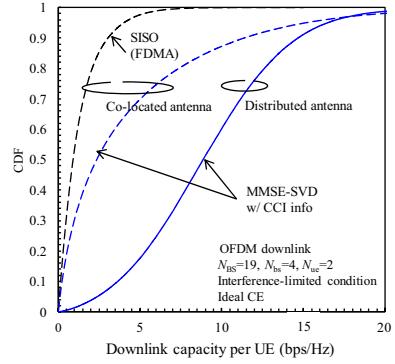


(a) OFDM 下りリンク

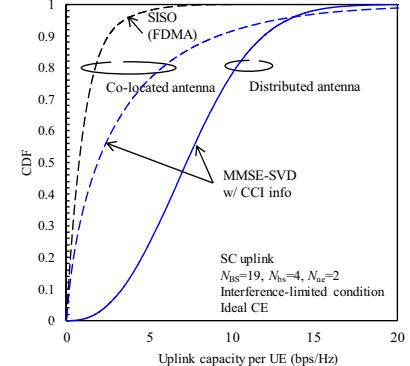


(b) SC 上りリンク

図 7 周波数選択性環境下での MMSE-SVD の BER 特性



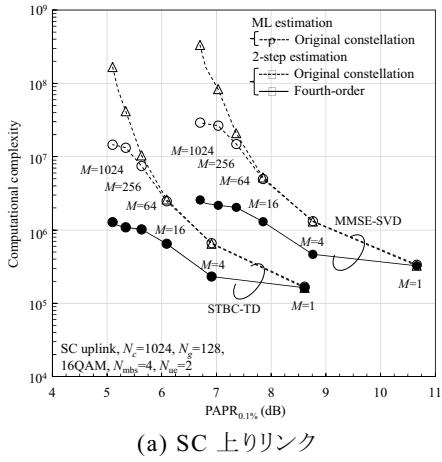
(a) OFDM 下りリンク



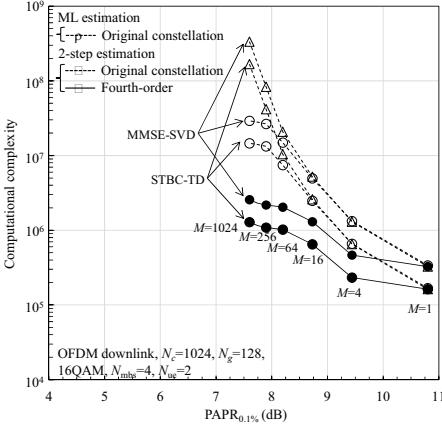
(a) SC 上りリンク

図 8 MMSE-SVD を用いるときの UE リンク容量の累積分布

まず、BS アンテナ本数 $N_{\text{bs}}=4$ と UE アンテナ本数 $N_{\text{ue}}=2$ 本とし、16 パス周波数選択性準静的レイリーフェージング環境(伝搬損失およびシャドウイング損失なし)における BER 特性を計算機シミュレーションで求めた。その結果を図 7 に示す。QAM 変調(4, 16, 64 値), 理想チャネル推定を仮定した。SC 上りリンクの BER 特性が OFDM 下りリンクより僅かに良いのは周波数ダイバーシチ効果によるものである。次に、 $N_{\text{BS}}=19$ 本の分散アンテナから $N_{\text{bs}}=4$ 本のアンテナを選択し、2 ストリーム伝送する UE を 2 重複する場合の UE リンク容量を計算機シミュレーションで求めた。その累積分布を図 8 に示す。比較のために $N_{\text{BS}}=19$ 本の分散アンテナを一ヵ所に集中させた場合のリンク容量もこれらの図にプロットした。なお、注目 BS セルの周辺に 6BS セルが干渉セルとして存在するものとし、BS 側では熱雑音電力に加えて他セル間干渉電力を考慮して MMSE フィルタを生成するものとした。分散アンテナ協調信号伝送は、19 本のアンテナを集中配置した場合に比べて、リンク容量を大幅に向かう。



(a) SC 上りリンク



(b) OFDM 下りリンク
図 9 PAPR と演算量のトレードオフ

3.4 ブラインド SLM

ブラインド SLM では、送信機側で元の送信信号波形に位相回転系列を乗算して低 PAPR の波形に変換する。受信機側では位相回転系列を推定してデマッピングを行うことで、位相回転系列情報(サイド情報)の送信を不要とする。ブラインド SLM では、送信側と受信側で位相回転系列表を共有している。全探査法(つまり最尤(ML)推定)を用いると、サイド情報を伝送する SLM に比べて受信側の演算量が増大してしまう。そこで、筆者らは 2 ステップ位相回転系列推定を提案した[10]。第 1 ステップではビタビアルゴリズムを用

いて位相回転系列推定を行う。第 2 ステップではハミング距離最小の系列を位相回転系列表の中から選択することによって第 1 ステップで発生した系列推定誤りを訂正する。更に演算量を低減するために、2 値位相回転($\{0^\circ, 135^\circ\}$)系列と 4 乗の信号点配置($\{I+jQ\}^4$)とを用いる改良 2 ステップ位相回転系列推定を提案した[11,12]。

16QAM 変調を用いるときの PAPR と演算量のトレードオフを図 9 に示す。2 値位相回転系列と 4 乗の信号点配置とを用いる改良 2 ステップ推定では、PAPR を 3dB 低減するとき(STBC-TD では $M=64$, MMSE-SVD では $M=16$)の演算量に着目すると、STBC-TD(MMSE-SVD)伝送のとき ML 系列推定の 10%(22%)まで、従来の 2 ステップ系列推定の 13%(23%)まで低減できる。

4. 端末クラスタリングとアンテナ選択

5G システムでは、面的周波数利用効率のより一層の向上が求められているから、4G システムよりも高密度で同一周波数を繰り返し利用しなければならない。また、マルチユーザ MMSE-SVD では、BS エリア内の多数の分散アンテナを使って多数の UE を空間多重すると、信号処理の演算量は実現不可能なくらい膨大になってしまう。この問題を解決するため、通信エリアを多数のクラスタに分け、スケジューリングにより各クラスタ内の通信ユーザを決定して分散 MIMO 協調伝送を行えば、クラスタ毎に信号処理を実行すればよいので演算量を削減できるとともに、互いに接近したユーザ同士が同時通信する確率をかなり下げることができる。しかし、このようなユーザクラスタリングを導入しても、各クラスタ内で独立にスケジューリングを行うため、クラスタ端に近いユーザは隣接クラスタから強い干渉を受けてしまうことがある。これを避けるため、クラスタ境界を越えてアンテナ選択を行う。19 クラスタ形成の場合について、4 分散アンテナを利用する STBC-TD(1UE/クラスタ)と MMSE-SVD(2UE 多重/クラスタ)の場合のアンテナ選択の一例を図 10 に示す。

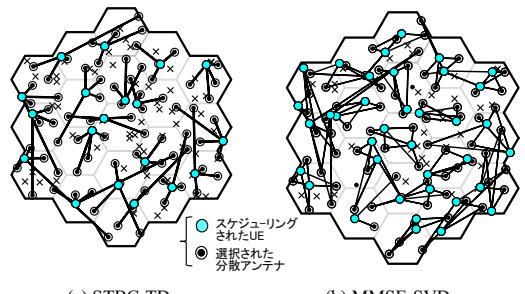
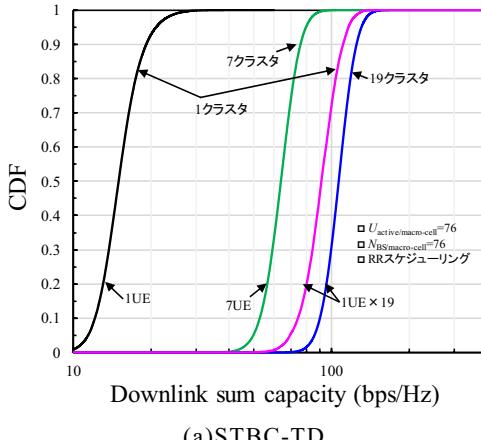


図 10 アンテナ選択の一例(19 クラスタ形成)

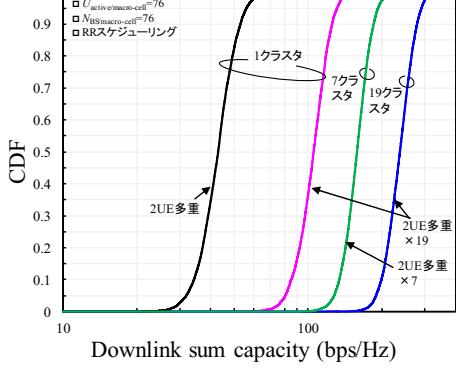
クラスタ形成無しとクラスタ形成有り(7 クラスタと 19 クラスタ)の場合の合計リンク容量を図 11 に示す。クラスタ間干渉の影響が大きい場合、MMSE-SVD の 1UE 当たりのストリーム数を 2 から 1 に落として 2UE 多重する方が高い合計リンク容量が得られる(これは、アンテナ数より多重ストリーム数を小さくしたことでダイバーシチ次数を増やすことができ、クラスタ間干渉を低減できるため), ここでは 1UE 当たりのストリーム数を 1 とした。

STBC-TD の場合、クラスタ形成ありで 19UE 同時接続のとき、クラスタ形成無しで 1UE 接続のときと比べて合計リンク容量(累積分布 50% 値)を約 7 倍に、クラスタ形成無しで 19UE 同時接続のときと比較しても約 1.2 倍に向上できることが分かる。これは、クラスタ形成により、互いに距離が離れ

た UE 同士が選択されることで、クラスタ間干渉が低減されたことと、各 UE が UE 近傍のアンテナを選択できることによる所望信号電力が向上するためである。また、7 クラスタ形成をし 7UE 接続した場合、クラスタ形成無しで 1UE 接続のときと比べて合計リンク容量（累積分布 50% 値）は約 4 倍の向上に留まる。7 クラスタ形成は 19 クラスタ形成よりも、同一周波数繰り返し数が少ないとおり、UE 当たりのクラスタ間干渉は小さくなるものの、同一周波数繰り返し数が約 1/3 となるため、1UE 接続のときと比べてリンク容量の向上は小さくなることが分かる。これらのことより、STBC-TD の場合、同時接続数を増やすように可能な限りクラスタを細分化した方がマクロセルの合計リンク容量を向上できることが分かる。一方、MMSE-SVD は STBC-TD よりおよそ 2.2 倍大きいリンク容量を実現できる。



(a) STBC-TD



(b) MMSE-SVD (1 stream/UE)
図 11 合計リンク容量

5. 適応 ICIC

5G システムの拡張性を確保するため、無線アクセスネットワーク内の各 BS は自律的に無線資源管理と無線信号処理を行う。本稿では、他セル干渉を観測してその統計処理を行って、ユーザを BS エリア端とそれ以外（エリア内）に分類し、BS エリア内ユーザに対しては第 4 章で述べたクラスタ形成とクラスタ境界を越えたアンテナ選択により BS エリア内でも同一周波数の繰り返し利用を行う。一方、BS エリア端に存在するユーザに対しては、FFR で予め割り当てられた帯域の利用に加えて、他の帯域の干渉レベルを測定して得られた SIR がスレシホールド以上の帯域の追加利用を許可する。これが適応 ICIC である[13]。図 12 に適応 ICIC の周波数割当の一例とセル端とセル中央 UE の通信割当時間

の一例を示す。各マクロセルの中央 UE には全周波数帯域 $W=W_1+W_2+W_3$ を割り当て、セル端 UE には 3 周波数繰り返し FFR に基づくデフォルト帯域に加えて、セル端 UE で観測した受信 SIR レベルがスレシホールド以上の帯域を追加して割り当てる。このように自律分散適応 ICIC では、BS 間でセル端 UE の帯域利用情報の共有なしに、各 BS が自律してマクロセル端で利用する帯域を決定する。

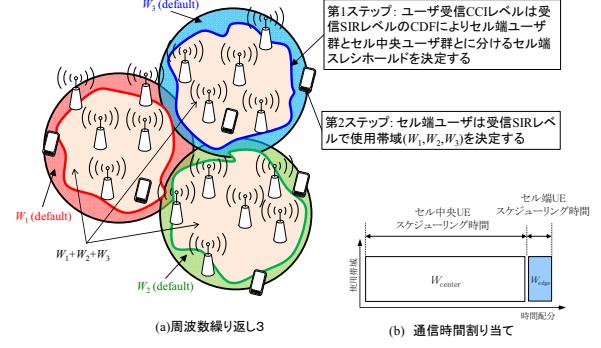


図 12 適応 ICIC の周波数割当の一例と通信時間割当

マクロセル内に 19 本の分散アンテナをランダム配置するものとした。図 13 にセル端 UE の最大利用可能帯域数を 2 に制限する適応 ICIC を用いるときの UE リンク容量の累積分布を示す。ICIC 非適用時と同程度の 90% リンク容量を達成しつつ、固定 ICIC（セル端 UE に 1 帯域のみ割当）と遜色のない 10% UE リンク容量を達成できる。SIR スレシホールドが 10dB のとき、セル端 UE の平均リンク容量は ICIC 非適用時と比べて約 1.3 倍に向上している。

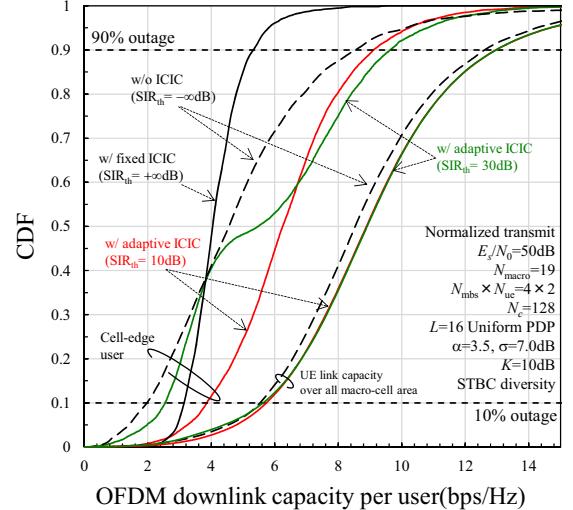


図 13 適応 ICIC（最大 2 帯域利用）による UE リンク容量の累積分布

6. むすび

分散 MIMO システム構成と協調伝送技術（STBC-TD, MMSE-SVD およびブラインド SLM）に関するこれまでの研究成果をまとめて報告した。また、面的周波数利用効率のより一層の向上を目指した UE クラスタリングとアンテナ選択および隣接セル間干渉を回避する適応 ICIC についての研究成果をまとめた。

5G およびそれ以降のシステムは超高密度無線システムになり、干渉問題が一層深刻化するはずであり、干渉環境の変化に適応した無線信号伝送や干渉抑圧技術の開発はますます重要になってくる。

謝辞

本報告の一部は、総務省委託研究開発「第5世代移動通信システム実現に向けた研究開発～超高密度マルチバンド・マルチアクセス多層セル構成による大容量化技術の研究開発～」による委託を受けて実施した研究開発による成果である。

文献

- [1] 平成27年度における電波資源拡大のための研究開発.
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000169.html.
- [2] F. Adachi, A. Boonkajay, Y. Seki, T. Saito, S. Kumagai, and H. Miyazaki, "Cooperative distributed antenna transmission for 5G mobile communications network," IEICE Trans. Commun., Vol.E100-B, No.8, pp. 1190-1204, Aug. 2017.
- [3] D. Falconer, S. Ariyavitsakul, A. Benyamin-Seeyar and B. Eidson, "Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems," IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 4, pp. 58-66, April 2002.
- [4] F. Adachi, K. Takeda, and H. Tomeba, "Frequency-domain equalization for broadband single-carrier multiple access," IEICE Trans. Commun., Vol.E92-B, No. 05, pp. 1441-1456, May 2009.
- [5] F. Adachi, H. Tomeba, and Kazuki Takeda, "Introduction of frequency-domain signal processing to broadband single-carrier transmissions in a wireless channel," IEICE Trans. Commun., Vol.E92-B, No.09, pp. 2789-2808, Sep. 2009.
- [6] S.M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," IEEE J. Sel. Areas. Commun., Vol.16, No.8, pp.1451-1458, Oct. 1998.
- [7] H. Tomeba, K. Takeda, and F. Adachi, "Space-time block coded-joint transmit/receive antenna diversity using more than 4 receive antennas," Proc. 2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Calgary, Canada, 21-25 September 2008.
- [8] Yuta Seki and Fumiyuki Adachi, "Improving link capacity by multi-user MMSE-SVD with ICI information in a distributed MIMO cellular network," IEICE Communications Express, Vol. 7, Issue 9, pp. 316-321, Sept. 2018.
- [9] A. Boonkajay and F. Adachi, "2-Step phase rotation estimation for low-PAPR signal transmission using blind selected mapping," Proc. IEEE Int. Symp. On Personal, Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC2017), Montreal, Canada, Oct. 2017.
- [10] A. Boonkajay and F. Adachi, "A Low-complexity phase rotation estimation using fourth-power constellation for blind SLM," Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC2018-Fall), Chicago, USA, Aug. 2018.
- [11] A. Boonkajay and F. Adachi, "Modified blind selected mapping for OFDM/single-carrier signal transmission," Proc. Asia-Pacific Conf. on Commun. (APCC2018), Ningbo, China, Nov. 2018.
- [12] T. Saito and F. Adachi, "De-centralized adaptive 2-step inter-cell interference coordination in distributed MIMO," Proc. Asia-Pacific Conf. on Commun. (APCC2018), Ningbo, China, Nov. 2018.